

A keményítő módosítása – A faliszt hatása a termoplasztikus keményítő mechanikai és funkcionális tulajdonságaira

Jelen cikkünkben a termoplasztikus keményítő (TPS) létrehozásának és módosításának lehetőségeit foglaljuk össze, különös tekintettel a faliszttal erősített kompozitokra. 36 m/m% glicerinnel lágyított keményítő felhasználásával állítottunk elő TPS/faliszt kompozitokat. A komponenseket gyorskeverőben homogenizáltuk, extrudáltuk, majd fröccsöntéssel készítettünk próbatesteket. Meghatároztuk a kompozitok mechanikai jellemzőit, szerkezetét, vízfelvételét és méretváltozását a falisztatartalom függvényében, amelyet 0 és 40 v/v% között változtattunk 7 lépésben. A TPS faliszttal való társítása több szempontból igen előnyös. A merevség és szilárdság nő a töltőanyag-tartalommal, különösen nagy szálhossz esetén. Mindez részben a mátrix gyenge tulajdonságaira, részben pedig az erős szemcse-mátrix adhézióra vezethető vissza. Ez utóbbi a vártnál is nagyobb csökkenést eredményez a kompozitok vízfelvételében, ezzel együtt a víztartalom még 40 v/v% falisztatalomnál is jelentős marad. A fröccsöntött TPS próbatestek zsugorodása rendkívül nagymértékű, és a méretváltozás igen hosszú idő alatt játszódik le. Mindez már 15-20 v/v% töltőanyag hozzáadásával kiküszöbölhető, a faliszt tehát eredményesen javítja a kompozitok mérettartósságát.

In our present article we review the production and modification of thermoplastic starch (TPS), with a focus on wood flour reinforced composites. TPS/wood composites were prepared from starch plasticized with 36 wt% glycerol. The components were homogenized by dry-blending, extruded and injection molded to tensile bars. Tensile properties, structure, water adsorption and shrinkage were determined as a function of wood content, which changed between 0 and 40 vol% in 7 steps. The modification of TPS with wood particles improves several properties considerably. Stiffness and strength increases, and the effect is stronger for fibers with larger aspect ratio. Wood fibers reinforce TPS considerably due to poor matrix properties and strong interfacial interactions, the latter resulting in smaller water absorption than predicted from additivity, but water uptake remains relatively large even in the presence of wood particles. The shrinkage of injection molded TPS parts is very large, and dimensional changes occur on a very long timescale. Shrinkage decreases to a low level already at 15–20 vol% wood content rendering the composites good dimensional stability.

Bevezetés

Az utóbbi években mind az ipar mind a tudományos részéről jelentősen nőtt az érdeklődés a természetes polimerek iránt, ami többek között a hulladékkezelés nehézségeivel, illetve a fosszilis nyersanyagok fogyatkozásával kapcsolatos félelmekkel magyarázható [1]. A cellulóz, a lignin és a keményítő a természetben legnagyobb mennyiségben rendelkezésre álló megújuló polimerek, amelyeket ma már az iparban is elterjedten alkalmaznak. Cellulózt és falisztet erősítőanyagként, lignint adalékként és számos vegyület alapanyagaként, míg a keményítőt legtöbb esetben hőre lágyuló polimerként használják fel. Jelen cikkünkben a termoplasztikus keményítő (TPS) létrehozásának és módosításának lehetőségeit foglaljuk össze, különös tekintettel a faliszttal erősített TPS kompozitokra.

A keményítő a poliszacharidok családjába tartozik, és a növényi sejtek fő energiaraktározója. Fő alkotóelemei, a lineáris szerkezetű amilóz és az elágazó szerkezetű amilopektin együttesen hozzák létre a mintegy 2 és 100 μm közötti átlagos átmérővel rendelkező, gyűrűs és lamellás szerkezetű, erősen kristályos szemcséket [2-4]. A makromolekulák közötti erős másodrendű kötések miatt a natív keményítő nem vihető ömledék állapotba bomlási hőmérséklete alatt, így módosítás nélkül nem dolgozható fel a hőre lágyuló műanyagok feldolgozási módszereivel [5,6]. Ehhez a molekulákat összetartó H-kötések mennyiségének csökkentése, a kristályos és szupramolekuláris szerkezet lebontása szükséges. Erre szolgál a kémiai módosítás – a hidroxilcsoportok helyettesítése kevésbé poláris szubsztituensekkel –, illetve a különböző lágyítószer alkalmazása. Az így létrehozott termoplasztikus keményítő feldolgozható extrúzióval, fröccsöntéssel, és más hagyományos módszerekkel.

A keményítő legjobb lágyítószer a víz, mivel kis molekulája könnyen bediffundál a láncok közé, és erős kölcsönhatást alakít ki azokkal. A polimer stabil szerkezetére jellemző, hogy szobahőmérsékleten a víz sem képes lágyítani, csak 60 – 70 °C-on indul meg a szemcsék duzzadása (zselizálás), amit a keményítő oldódása követ. A víz hátránya ugyanakkor, hogy az így előállított TPS tulajdonságait nagymértékben befolyásolja a környezet hőmérséklete és páratartalma, ezért gyakran kevésbé illékony lágyítószereket, polioloikat, karbamidot, formamidot, illetve leggyakrabban glicerint alkalmaznak a módosításhoz [3,4]. Ez ugyanakkor csak részben jelent megoldást a problémára. Az így előállított TPS minden esetben legalább háromkomponensű rendszer, amely a polimer és a lágyító mellett bizonyos mennyiségű vizet is tartalmaz, víztartalma pedig jelentősen befolyásolja tulajdonságait. Ezzel együtt a TPS számos előnyös tulajdonsággal, többek között jó feldolgozhatósággal, rugalmassággal és lebonthatósággal rendelkezik. Főbb hátrányait gyenge mechanikai jellemzői, rossz mérettartása és vízérzékenysége jelenti. Az említett problémák megoldása érdekében a keményítőt gyakran társítják más polimerekkel, töltő-, illetve erősítőanyagokkal.

A keményítő műanyagipari alapanyagként legnagyobb mennyiségben polimer keverékekben kerül felhasználásra, amit a témához kapcsolódó szabadalmak és publikációk száma is jól tükröz. A szintetikus polimerekkel (poliolefinok, polisztirol) történő társítás több évtizedes múltra tekinthet vissza. Ezek a keverékek csak részleges lebonthatósággal rendelkeznek, így nem felelnek meg a mai, komposztálhatósággal kapcsolatos szabványoknak, sőt, adott körülmények között (pl. mezőgazdasági fóliák) használatuk káros is lehet a környezetre. Ennek ellenére több nagy gyártó továbbra is rendelkezik ilyen típusú termékkel, és az elmúlt években is rendületlenül jelennek meg publikációk erről a területről [7-15].

Biodegradálható, komposztálható TPS keverékeket biopolimerek, elsősorban biológiailag lebontható poliészterek felhasználásával hoznak létre [3,4]. Gyakorlati szempontból legnagyobb jelentőséggel a polikaprolakton (PCL) [16-19], a politejsav (PLA) [19-22], a polihidroxialkanoátok (PHA) [23-25], illetve a különböző alifás-aromás kopolimerek bírnak. Utóbbiak egyik legismertebb képviselője a poli(butilén-adipát-tereftalát) (PBAT) [18,26-28]. A biológiailag lebontható TPS keverékek készítésének két alapvető célja lehet: első a TPS előnytelen tulajdonságainak módosítása más polimerek adagolásával, de legalább ekkora jelentőséggel bír a jelenleg még igen drága biopolimerek árának csökkentése, ütésállóságuk vagy biológiai lebonthatóságuk növelése keményítő hozzáadásával. A keverékek szerkezetét és tulajdonságait a komponensek elegyíthetősége, illetve összeférhetősége határozza meg. Mindkét paraméter elsősorban a komponensek között kialakuló kölcsönhatásoktól függ. Mivel mind a keményítő,

mind a gyakran alkalmazott társ-polimerek rendelkezik poláris csoportokkal, általában erős másodrendű kötések alakulnak ki a komponensek között. Ezzel együtt számos alkalmazás esetében elengedhetetlen a kölcsönhatások és a szerkezet módosítása, a kompatibilizálás. Ennek jelentőségéről és a lehetséges módszerekről egy korábbi publikációnkban [29] számoltunk be.

A TPS egyik legfőbb előnyének, biodegradálhatóságának megőrzése kiemelt szempont a kompozitok esetében is, ezért a keményítő erősítésére igen gyakran természetes szálakat használnak [30-34]. Ezen belül is kiemelt jelentőséggel bír a faliszt [32,35-39], alacsony árának és jó feldolgozhatóságának köszönhetően. Hasonló kémiai felépítésük következtében jó kölcsönhatás alakul ki a keményítő mátrix és a töltőanyag szemcséi között [30,37,40-42]. Jelentős hatása van a szerkezetnek is: a szálak hosszával és mennyiségével arányosan nő a kompozitok merevsége és szilárdsága [30]. Fontos kiemelni, hogy a töltőanyag a keményítő vízálerkenységére is hatással bír: a víztartalom hatása a faliszt hozzáadására jelentősen csökken [40,42-45]. Ennél jóval ritkábban vizsgált probléma a kompozitok mérettartása, annak ellenére, hogy ennek a gyakorlat szempontjából kiemelt jelentősége van. Az eddig publikált eredmények arra utalnak, hogy a mérettartósság is javul a töltőanyag hozzáadásának hatására [30].

Összességében elmondható tehát, hogy a keményítő erősítése faliszttal az eddigi eredmények alapján számos előnnyel rendelkezik. Ennek ellenére viszonylag kevés publikáció jelent meg eddig a témában [32,35-39], és még kevesebb munka elemzi szisztematikusan a töltőanyag hatását széles összetételi tartományon [35-37]. A TPS/faliszt kompozitokkal kapcsolatos kutatómunkánk célja, hogy ezen változtassunk; a továbbiakban elemezzük különböző szemcseszerkezeti jellemzőkkel rendelkező falisztek hatását a rendszer szilárdságára és egyéb tulajdonságaira. A kutatás során nagy hangsúlyt fektetünk a töltőanyag és a polimer közötti határfelületi adhézió mennyiségi leírására, illetve a kölcsönhatások és az erősítő hatás közötti összefüggés meghatározására is, ezekre ugyanakkor hely hiányában csak röviden térünk ki.

Kísérleti rész

A kísérletekhez felhasznált keményítőt a Hungrana Kft. (Magyarország) Biztosította; az alapanyag víztartalma 12 % volt. A lágyítószerként alkalmazott glicerint (víztartalom: 0,5 %) a Molar Chemicals Kft.-től (Magyarország) szereztük be, és szárítás nélkül használtuk fel. Mindhárom faliszt töltőanyag a Rettenmaier and Söhne GmbH (Németország) terméke. Tulajdonságaikat az 1. Táblázat foglalja össze. Mivel a kompozit tulajdonságai szempontjából az egyik legfontosabb jellemző a szemcsék alakú tényezője (legnagyobb és legkisebb méretük hányadosa), a töltőanyagok elnevezése is ez alapján történt. A W126 jelzésű faliszt alakú tényezője ennek megfelelően 12,6.

1. táblázat A vizsgált faliszt szemcsék elnevezése, illetve jellemző méretei

Töltőanyag	Rövidítés	D[4,3] ^a (μm)	Hossz ^b (μm)	Átmérő ^b (μm)	Alaki tényező
Arbocel CW 630	W35	39,6	93,5	33,3	3,5
Filtracel EFC 1000	W68	213,1	363,4	63,9	6,8
Arbocel FT 400	W126	171,2	235,2	21,8	12,6

^a Térfogat szerinti átlagos szemcseméret

^b SEM felvételek alapján meghatározott átlagos értékek

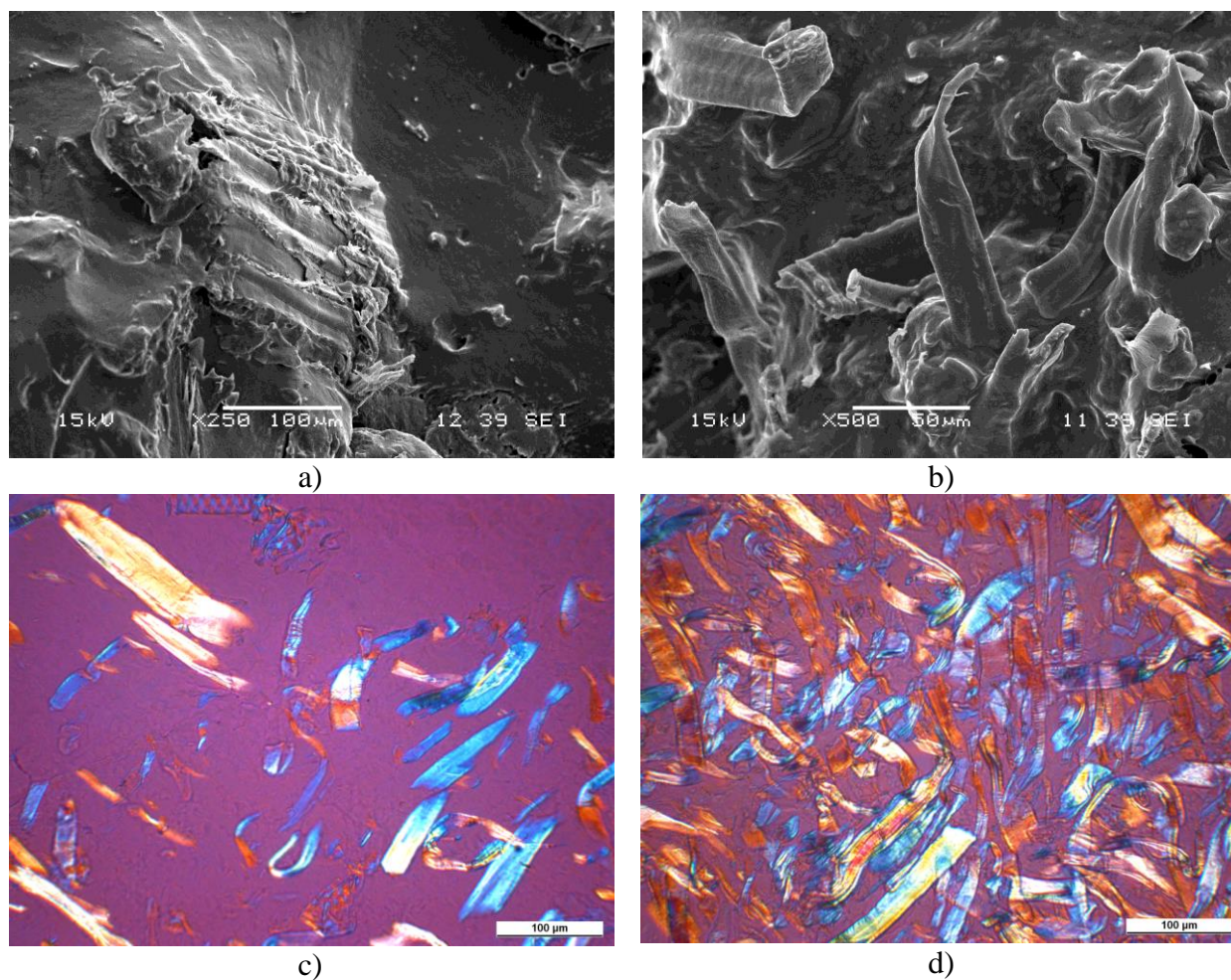
A kompozitok előállítását megelőzően mind a keményítőt (100 °C, 24 óra), mind a falisztet (105 °C, 4 óra) szárítottuk. Henschel FM/A10 gyorskeverőben 2000 perc⁻¹ fordulatszámon 36 % glicerinnel lágyított keményítőt állítottunk elő. A töltőanyagot a lágyítási folyamat végén adagoltuk a keverőbe 5, 10, 15, 20, 30 illetve 40 v/v%-os arányban. Az összetevők homogenizálását Haake Rheocord EU 10V meghajtó egységhez csatlakoztatott Rheomex 3/4" típusú egycsigás extruderen végeztük 60 perc⁻¹ fordulatszámon. A henger hőmérséklete az egyes zónákban 140-150-160 °C volt, míg a szerszámot 170 °C-on tartottuk. A további vizsgálatokhoz ISO-527 1A szabványnak megfelelő próbatesteket állítottunk elő Battenfeld BA 200 CD típusú hidraulikus fröccsöntőgépen, 54 mm/s fröccssebességgel és 35 s hűtési idővel. A henger hőmérséklete 140-160-170 °C, a fűvókáé 180 °C, míg a szerszámé 40 °C volt.

A szálak és a kompozitok szerkezetét pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és polarizációs optikai mikroszkóppal (POM) vizsgáltuk. A SEM felvételeket a 10 V/V% falisztet tartalmazó próbatestek szakított tönkremeneteli felületéről készítettünk. A POM képeket a mintákból egy Leica EM UC6 típusú kriogén ultramikrotómmal előállított 10 µm vastag szeletekről készítettük egy Leitz EM FC7 típusú polarizációs mikroszkóppal. A SEM felvételeket Jeol JSM-6380 elektronmikroszkóppal, szakított felületekről készítettük. Röntgendiffrakcióval (WAXS) jellemeztük a keményítő por, a TPS, valamint a kompozitok kristályszerkezetét Phillips PW 1830/PW 1050 berendezés segítségével. A mechanikai vizsgálatok során a mintákat 5 mm/perc sebességgel szakítottuk el Instron 5566 szakítógépen, 115 mm befogási hosszal 23 °C-on és 50 % páratartalom mellett. A szakítás közben az akusztikus emissziós jeleket is detektáltuk Sensophone AED 40/4 berendezés segítségével; a beállított érzékelési szint 20 dB volt. A kompozitok vízfelvételét fröccsöntött próbatestek tömegváltozása alapján határoztuk meg klimatizált (23 °C, 50 % páratartalom) térben. A páratartalmat Mg(NO₃)₂ túltelített vizes oldatával állítottuk be. A méretváltozást a fröccsöntött próbatestek hosszának mérésével határoztuk meg az idő függvényében; a mintákat exsikkátorban, vízmentes környezetben tartottuk.

A kompozitok szerkezete

A szerkezet alapvetően meghatározza a kompozitok tulajdonságait. A faliszttal erősített rendszerekben előforduló legfontosabb szerkezettel kapcsolatos jelenségek lehetnek a töltőanyag aggregációja, valamint a szálak tördelődése és orientációja a feldolgozás során. Korábbi kutatásaink alapján kijelenthetjük, hogy a szemcsék aggregációja csak ritka esetekben fordul elő, ugyanakkor az anizotrop szálak gyakran érintkeznek egymással pusztán geometriai okból [46-49]. A hosszú szálak egyfajta laza hálószerkezetet is létrehozhatnak [50-51]. Az 1. a) és b) ábrákon két kompozit törési felületéről készített SEM felvétel látható. Előbbin egy a mátrixba beágyazott, nagyméretű szemcse látható, míg utóbbi ábrán eltört szálak figyelhetők meg a törési felületen. A képek általában arról tanúskodnak, hogy a töltőanyag megfelelően diszpergálódik a polimerben. Természetesen a SEM felvételek önmagukban nem elegendők a szerkezet általános jellemzésére, hiszen a mintának csak egy nagyon kis részét mutatják be. Ezzel együtt kitűnően alkalmazhatók a többi mérésből levont következtetések alátámasztására, és egyedi jelenségek, például a szálak törésének szemléletes bemutatására. A kisebb felbontással készített POM felvételek átfogóbb képet nyújtanak a minta szerkezetéről (1. c) és d) ábrák). Kisebb faliszt-koncentrációnál (5 v/v%) a szemcsék homogén diszperziója figyelhető meg az 1. c) ábrán, míg nagyobb töltőanyag-tartalomnál (40 v/v%, 1. d) ábra) a szálak érintkeznek egymással, de ahogy arra korábbi

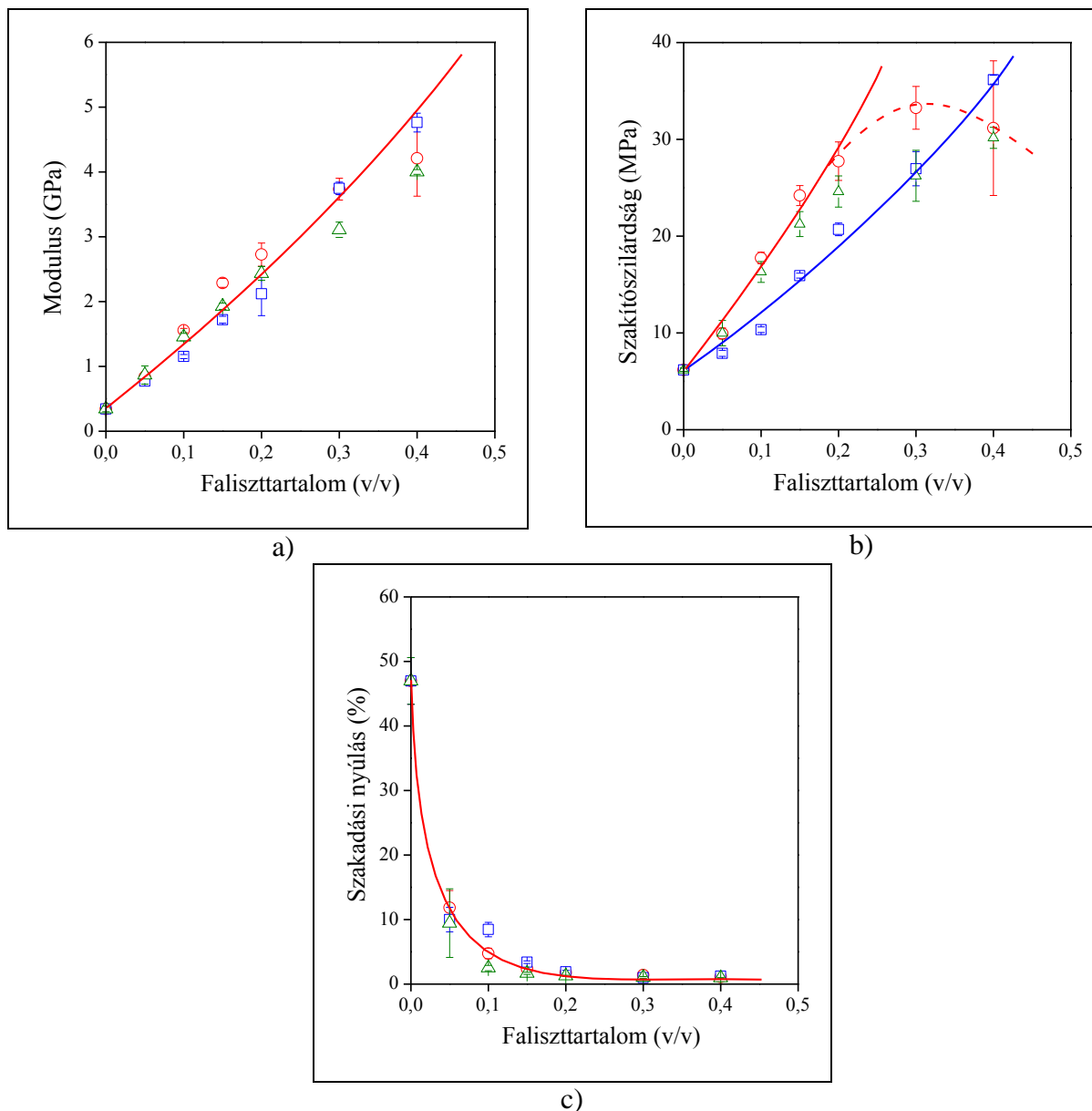
publikációnkban [50] rámutattunk, valódi aggregátumok ebben az esetben sem jönnek létre. Mindazonáltal a szálak fizikai érintkezése minden bizonnyal befolyásolja a mechanikai jellemzőket.



1. ábra A TPS/falixzt kompozitok szerkezete; a) W68, 10 v/v%, SEM, b) W126, 10 v/v%, SEM, c) W126, 5 v/v %, POM, d) W126, 40 v/v %, POM

Mechanikai tulajdonságok

A töltőanyagok hatását egy adott kompozit jellemzőire legegyszerűbben a merevség változásán keresztül követhetjük nyomon. A TPS/falixzt kompozitok modulusát a száltartalom függvényében a 2. a) ábrán mutatjuk be. A merevség az eredeti 0,35 GPa-ról mintegy 4,50 GPa-ra változik 40 v/v% száltartalomnál, vagyis a töltőanyag rendkívül nagy hatással van a mechanikai viselkedésre. A kezdeti meredek emelkedés ugyanakkor nagyobb száltartalomnál mérséklődik, ami szerkezeti okokra vezethető vissza: egyrészt magyarázhatja a szálak fizikai érintkezése [47-49], illetve esetlegesen egyfajta hálószerkezet kialakulása a hosszú szálak esetében [51]. A mechanikai tulajdonságok összetételfüggése is ezt a magyarázatot támasztja alá, mivel a szálhossz növelésével egyre nagyobb eltérést tapasztalunk a kezdeti tendenciától. A hosszabb szálak kis koncentrációnál nagyobb erősítőhatással bírnak, a száltartalom növelésével ugyanakkor ez a különbség eltűnik.



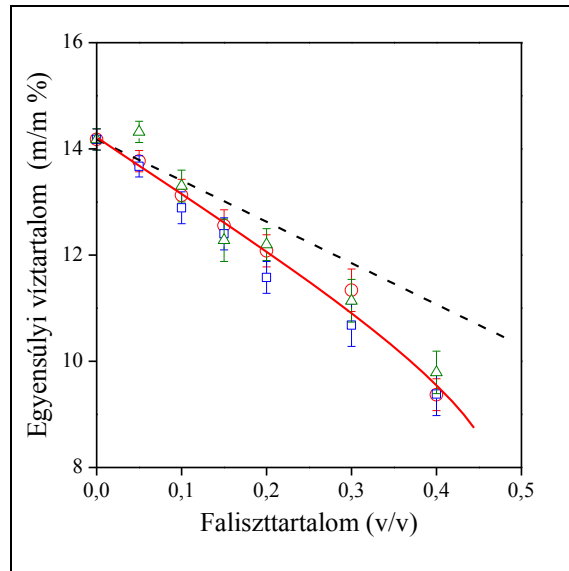
2. ábra A TPS/faliszt kompozitok mechanikai tulajdonságai; a) merevség, b) szilárdság, c) szakadási nyúlás (– W126, ▽ W68, 8 W35)

Szálak a kompozit szilárdságát is jelentősen befolyásolják, amint az a 2. b) ábrán jól látható. A töltőanyag-tartalommal ez a jellemző is növekszik, tehát valódi erősítő hatásról beszélhetünk. Hasonló következtetéseket vonhatunk le, mint a modulus esetében; a különböző alakúak rendelkező szemcsék hatása jelentősen eltér. A kisméretű (W35), valamint a hosszú szálak (W126) sokkal hatékonyabban növelik a kompozit szilárdságát, ugyanakkor a szerkezeti hatások is jelentősebbek ezek alkalmazásakor. A deformálhatóság, azaz a minták szakadási nyúlása nagymértékben csökken a töltőanyag hozzáadására (2.c ábra), ami a kompozitok esetében megfelel a várakozásoknak. A három száltípus hatása igen hasonló. Bár a fajlagos felület némileg befolyásolni látszik ezt a jellemzőt is, a különbség elenyésző.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a faliszt alkalmazása jelentős előnnyel bír, amennyiben a merevség és szilárdság növelése a cél. Az erősítő hatás pontosabb leírásához ugyanakkor további elemzés szükséges. Hely hiányában jelen cikkünkben nem térünk ki részletesen az eredmények mennyiségi analizésére. Érdemes kiemelni ugyanakkor két tényezőt: a töltőanyag teherhordó-képességének jellemzésére szolgáló B paramétert, amely a kompozitok szilárdságának összetétel-függéséből számítható, illetve a szemcse-mátrix határfelület elválásához szükséges kritikus feszültségértéket [52,53], amelyet a tönkremenetel során rögzített akusztikus jelekből határozhatunk meg. Mindkét mennyiség a szemcse-mátrix adhézióval hozható kapcsolatba, és esetünkben értékük rendkívül erős kölcsönhatást mutat a keményítő és a faliszt között. Az akusztikus emisszió analizise emellett a tönkremenetel során mikroszkopikus szinten lejátszódó deformációs jelenségekről is felvilágosítást ad. A TPS/faliszt kompozitokban lejátszódó folyamatok ugyanakkor meglehetősen nehezen értelmezhetők az akusztikus jelek alapján. A szakított felületekről készített elektronmikroszkópos felvételeket (1. a) és b) ábrák) is figyelembe véve a legvalószínűbb tönkremeneteli folyamatok a szálak törése, illetve a szemcse-mátrix határfelületek elválása.

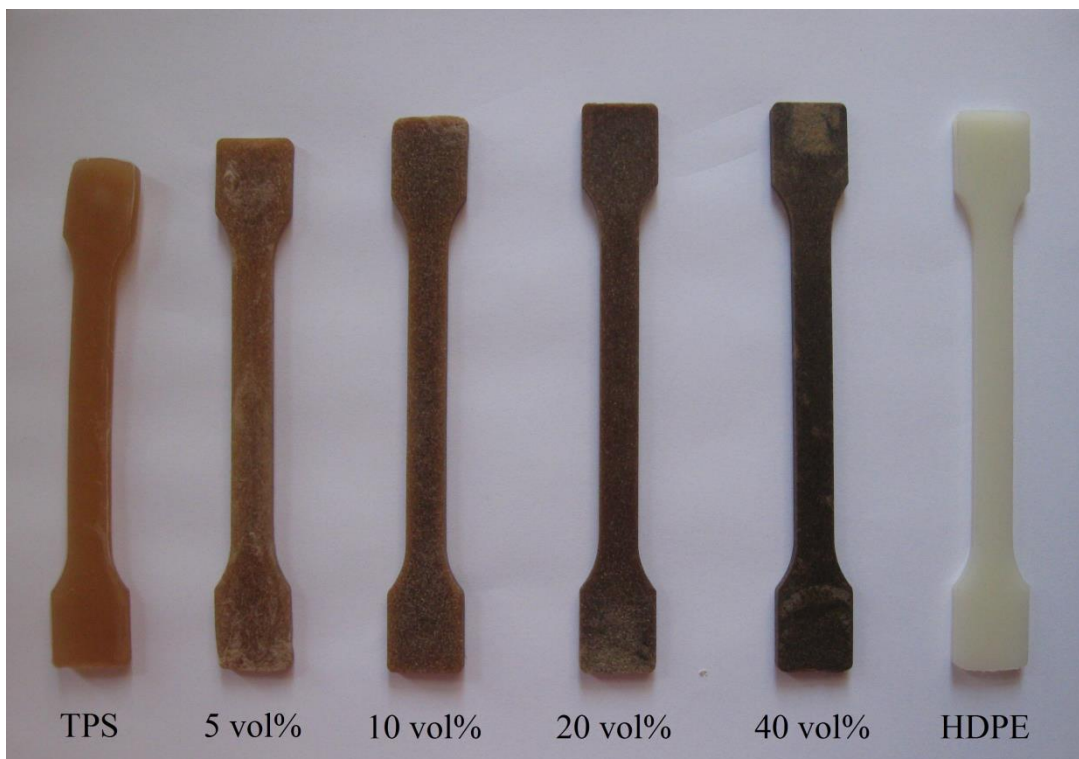
Funkcionális jellemzők

Ahogy arra a bevezető szakaszban már kitértünk, a termoplasztikus keményítő víztartalma jelentősen befolyásolja annak tulajdonságait, ezáltal a vízfelvétel komoly problémát okoz a polimer alkalmazása során. Korábbi kutatások arra a következtetésre jutottak, hogy a természetes szálakkal való társítás hatékonyan képes csökkenteni a vízfelvételt [40,42-45]. Az általunk vizsgált kompozitok egyensúlyi víztartalmát mutatja be a 3. ábra a száltartalom függvényében. Eredményeink egyértelműen összhangban vannak az irodalmi adatokkal; a vízfelvétel jelentősen mérsékelhető a faliszt adagolásával, míg a különböző szemcsék hatása gyakorlatilag megegyezik. A szaggatott vonal az additivitásnak megfelelő értékeket jelzi, azaz a keményítő és a faliszt vízfelvételének egyszerű összegzésével számított érték. Jól látható, hogy a valódi egyensúlyi víztartalom ennél kisebb, ami minden bizonnyal a szemcse és a mátrix között kialakuló erős kölcsönhatásokkal magyarázható. Meg kell jegyeznünk ugyanakkor, hogy a vízfelvétel még 40 v/v% töltőanyag jelenlétében is jelentős, így hatását mindenképp figyelembe kell venni az alkalmazás során.

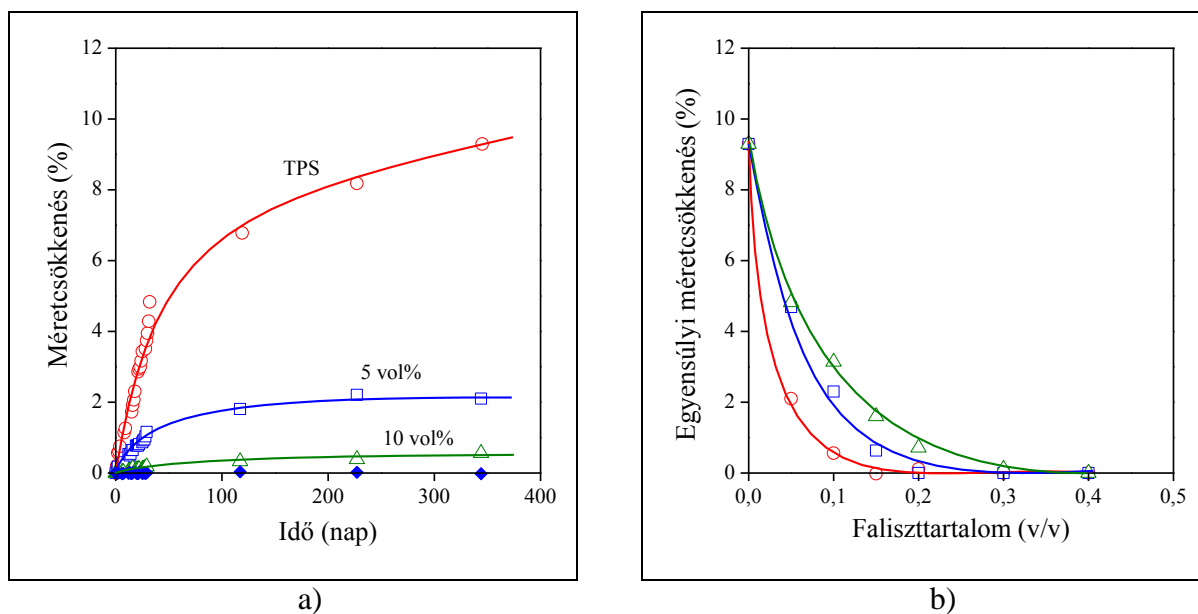


3. ábra A kompozitok egyensúlyi víztartalma a töltőanyag-tartalom függvényében (– W126, ▽ W68, 8 W35)

A TPS zsugorodása, ezáltal rossz mérettartása, egy másik fontos jellemző, amely korlátozza széleskörű felhasználását. A 4. ábrán különböző töltőanyag-tartalommal készített TPS/W68 kompozitokat mutatunk be. A felvétel 345 nappal a feldolgozás után készült, referenciaként pedig egy nagysűrűségű polietilén (HDPE) próbatest látható a kép jobb oldalán. Utóbbi kristályos polimer, zsugorodása a mérnöki gyakorlatban jelentősnek mondható. Ezzel összehasonlítva a TPS zsugorodása és alaktorzulása rendkívül nagymértékű, és egyértelműen nem elfogadható a legtöbb alkalmazási területen. A röntgendiffrakciós mérések alapján kijelenthetjük, hogy a méretváltozást nem a tárolási idő alatt lejátszódó kristályosodás okozza, ez utóbbinak nem láttuk jelét. Az ok feltételezésünk szerint a merev keményítő molekulák lassú relaxációjában keresendő. A fröccsöntött termékekben a polimer szerkezete nem egyensúlyi, és a lágyító jelenléte lehetővé teszi annak megváltozását, azaz a relaxációt, ugyanakkor ennek időigénye meglehetősen nagy.



4. ábra Különböző töltőanyag-tartalommal készített TPS/faliszt (W68) kompozitok, illetve HDPE referencia 345 nappal a feldolgozás után



5. ábra A kompozitok méretváltozása a) az idő (– 0, \forall 5, 8 10 v/v%), illetve b) a száltartalom függvényében (– W126, \forall W68, 8 W35)

A méretváltozás időbeli lefutását az 5. a) ábra mutatja be. A hosszú idő alatt felvett értékek telítési görbét adnak, ugyanakkor a zsugorodás mértéke már 5 v/v% töltőanyag hatására

nagymértékben csökken, 10 v/v% felett pedig gyakorlatilag elhanyagolható a tiszta TPS-hez képest. További fontos következtetéseket vonhatunk le az 5. b) ábra alapján, amelyen a zsugorodás egyensúlyi értéke látható a töltőanyag-tartalom függvényében. A koncentráció növelésével meredeken csökken a végső méretcsökkenés, és a mérettartósság tovább mérsékelhető a szálhossz növelésével. A faliszt adagolása egyértelműen előnyös tehát a zsugorodás megakadályozása érdekében, így segítségével a TPS alkalmazása további alkalmazási területeken is lehetséges.

4. Összefoglalás

A keményítő nagy mennyiségben hozzáférhető, megújuló alapanyag, amit egyre elterjedtebben hasznosítanak a műanyagiparban is. Mind a hatékony feldolgozáshoz, mind pedig a széleskörű alkalmazáshoz szükséges a keményítő tulajdonságainak módosítása, amelyre számos út kínálkozik. A TPS falisztal való társítása több szempontból igen előnyös. A merevség és szilárdság nő a töltőanyag-tartalommal, különösen nagy szálhossz esetén. Mindez részben a mátrix gyenge tulajdonságaira, részben pedig az erős szemcse-mátrix adhézióra vezethető vissza. Ez utóbbi a vártnál is nagyobb csökkenést eredményez a kompozitok vízfelvételében, ezzel együtt a víztartalom még 40 v/v% falisztartalomnál is jelentős marad. A fröccsöntött TPS próbatestek zsugorodása rendkívül nagymértékű, és a méretváltozás igen hosszú idő alatt játszódik le. Mindez már 15-20 v/v% töltőanyag hozzáadásával kiküszöbölhető, a faliszt tehát eredményesen javítja a kompozitok mérettartósságát. Összességében elmondható, hogy a termoplasztikus keményítőhöz képest a falisztal erősített kompozitok a tulajdonságok előnyösebb kombinációját kínálják számos alkalmazási területen.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönettel tartoznak Sinka Lászlónak a kompozitok előállításában nyújtott segítségéért. Nagyra értékeljük az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA K 101124) heterogén polimer rendszerek vizsgálatához nyújtott anyagi támogatását.

*Imre Balázs, egyetemi tanársegéd
Müller Péter, egyetemi tanársegéd
Móczó János, tudományos főmunkatárs
Fekete Erika, tudományos főmunkatárs
Pukánszky Béla, tanszékvezető, egyetemi tanár*

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék
Műanyag- és Gumiipari Laboratórium*

*Magyar Tudományos Akadémia
Természettudományi Kutatóközpont
Polimer Fizikai Osztály*

Irodalomjegyzék

1. Markarian J. *Plastics, Additives and Compounding* 2008;**10**:22–25.
2. Avérous L, Pollet E. Chapter 2. p. 13. in *Green Energy and Technology* Eds. Avérous L, Pollet E. Springer-Verlag, London (2012)
3. Avérous L. *J Macromol Sci C Polym Reviews* 2004;**C44**:231–274.
4. *Thermoplastic starch* Eds. Janssen L, Moscicki L. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim (2009)
5. Jang JK, Pyun YR. *Starch/Stärke* 1996;**48**:48–51.
6. Swanson CL, Shogren RL, Fanta GF, Imam SH. *J Environ Polym Deg* 1993;**1**:155–166.
7. Wang SJ, Yu JG, Yu JL. *Polym Degrad Stabil* 2005;**87**:395–401.
8. Rosa DS, Guedes CGF, Carvalho CL. *J Mater Sci* 2007;**42**:551–557.
9. Kaseem M, Hamad K, Deri F. *Polym Bull* 2012;**68**:1079–1091.
10. Sharif A, Aalaie J, Shariatpanahi H, Hosseinkhanli H. *J Polym Res* 2011;**18**:1955–1969.
11. Wang N, Yu J, Ma X, Wu Y. *Carbohydr Polym* 2007;**67**:446–453.
12. Cerclé C, Sarazin P, Favis BD. *Carbohydr Polym* 2013;**92**:138–48.
13. Taghizadeh A, Sarazin P, Favis B. *J Mater Sci* 2013;**48**:1799–1811.
14. Ruiz HV, Martinez EM, Mendez MAA. *Starch/Stärke* 2011;**63**:42–51.
15. Pang M-M, Pun M-Y, Ishak ZAM. *J Appl Polym Sci* 2013;**129**:3237–3246.
16. Myllymki O, Myllrinen P, Forssell P, Suortti T, Lähtenkoorva K, Ahvenainen R, Poutanen K. *Packag Technol Sci* 1998;**11**:265–274.
17. Averous L, Moro, Dole P, Fringant C. *Polymer* 2000;**41**:4157–4167.
18. Averous L, Fringant C. *Polym Eng Sci* 2001;**41**:727–734.
19. Schwach E, Averous L. *Polym Int* 2004;**53**:2115–2124.
20. Yu L, Dean K, Li L. *Prog Polym Sci* 2006;**31**:586–589.
21. Yokesahachart C, Yoksan R. *Carbohydr Polym* 2011;**83**:22–31.
22. Huneault MA, Li H. *Polymer* 2007;**48**:270–280.
23. Zhang M, Thomas NL. *J Appl Polym Sci* 2010;**116**:688–694.
24. Don TM, Chung CY, Lai SM, Chiu HJ. *Polym Eng Sci* 2010;**50**:709–718.
25. Lai SM, Don TM, Huang YC. *J Appl Polym Sci* 2006;**100**:2371–2379.
26. Stagner JA, Alves VD, Narayan R. *J Appl Polym Sci* 2012;**126**:135–142.
27. Brandelero RPH, Grossmann MVE, Yamashita F. *Carbohydr Polym* 2011;**86**:1344–1350.
28. Ren J, Fu HY, Ren TB, Yuan WZ. *Carbohydr Polym* 2009;**77**:576–582.
29. Imre B, Pukánszky B. *Eur Polym J* 2013;**49**:1215–1233.
30. Avérous L, Fringant C, Moro L. *Polymer* 2001;**42**:6565–6572.
31. Benezet JC, Stanojlovic-Davidovic A, Bergeret A, Ferry L, Crespy A. *Ind Crop Prod* 2012;**37**:435–440.
32. Chakraborty A, Sain M, Kortschot M, Cutler S. *J Biobased Mater Bio* 2007;**1**:71–77.
33. Sreekumar PA, Gopalakrishnan P, Leblanc N, Saiter JM. *Compos A Appl Sci Manuf* 2010;**41**:991–996.
34. Sreekumar PA, Leblanc N, Saiter JM. *Polym Compos* 2010;**31**:939–945.
35. Abbott AP, Palazuela Conde J, Davis SJ, Wise WR. *Green Chem* 2012;**14**:3067–3070.
36. Agnantopoulou E, Tserki V, Marras S, Philippou J, Panayiotou C. *J Appl Polym Sci* 2012;**126**:E273–E281.
37. Avérous L, Boquillon N. *Carbohydr Polym* 2004;**56**:111–122.
38. Kuciel S, Kúzniar P, Mikula J, Liber-Knéc A. *J Biobased Mater Bio* 2012;**6**:475–480.
39. Kuciel S, Liber-Knéc A. *J Biobased Mater Bio* 2009;**3**:269–274.

40. Curvelo AAS, de Carvalho AJF, Agnelli JAM. *Carbohydr Polym* 2001;**45**:183–188.
41. Martins IMG, Magina SP, Oliveira L, Freire CSR, Silvestre AJD, Neto CP, Gandini A. *Compos Sci Technol* 2009;**69**:2163–2168.
42. Soykeabkaew N, Laosat N, Ngaokla A, Yodsuwan N, Tunkasiri T. *Compos Sci Technol* 2012;**72**:845–852.
43. Ayadi F, Dole P. *Carbohydr Polym* 2011;**84**:872–880.
44. Lu YS, Weng LH, Cao XD. *Carbohydr Polym* 2006;**63**:198–204.
45. Ma XF, Yu JG, Kennedy JF. *Carbohydr Polym* 2005;**62**:19–24.
46. Dányádi L, Móczó J, Pukánszky B. *Compos A Appl Sci Manuf* 2010;**41**:199–206.
47. Dányádi L, Renner K, Móczó J, Pukánszky B. *Polym Eng Sci* 2007;**47**:1246–1255.
48. Renner K, Kenyó C, Móczó J, Pukánszky B. *Compos A Appl Sci Manuf* 2010;**41**:1653–1661.
49. Renner K, Móczó J, Pukánszky B. *Compos Sci Technol* 2009;**69**:1653–1659.
50. Faludi G, Dora G, Renner K, Móczó J, Pukánszky B. *Carbohydr Polym* 2013;**92**:1767–1775.
51. Faludi G, Hári J, Renner K, Móczó J, Pukánszky B. *Compos Sci Technol* 2013;**77**:67–73.
52. Turcsányi B, Pukánszky B, Tüdös F. *J Mater Sci Lett* 1988;**7**:160–162.
53. Pukánszky B. *Composites* 1990;**21**:255–262.